

## Обґрунтування вибору та оптимізація параметрів технології гарячого ресайклінгу асфальтобетонного покриття

В. Я. Савенко, В. В. Гончаренко, С. І. Ілляш, А. Я. Мудриченко,  
І. О. Балашов

Методом експертних оцінок обґрунтовано, що найбільш вагомими факторами, які суттєво впливають на механізм та кінетику технологічних процесів приготування регенованої суміші, є температура приготування суміші та вміст регенеруючої добавки. Досліджено їх вплив на фізико-механічні показники регенованого асфальтобетону, отриманого за технологією гарячого ресайклінгу асфальтобетонного покриття методом «in place». При проведенні експериментальних досліджень отримані залежності фізико-механічних показників (водонасичення, міцність на стиск при 0 °С та при 50 °С) регенованого асфальтобетону від вмісту добавки та температури перемішування. Отримано математичні моделі у вигляді поліномів другого ступеню, що описують залежність водонасичення та міцності при стиску регенованого асфальтобетону від температури приготування та вмісту регенеруючої добавки. Встановлено що із збільшенням температури перемішування збільшується міцність на стиск при 0 °С, в той же час міцність на стиск при 50 °С та показник водонасичення зменшуються. Із збільшенням регенеруючої добавки всі фізико-механічні показники, які були досліджені, зменшуються. На основі аналізу отриманих результатів встановлені області раціональних значень температури перемішування розпушеної асфальтобетонної крихти (125–135) °С, та вмісту добавки (0,26–0,28) % при приготуванні регенованої гарячої асфальтобетонної суміші. Отримана суміш за фізико-технічними показниками задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови» до гарячих дрібнозернистих асфальтобетонних сумішей. Отримані результати корисні при проектуванні технології гарячого ресайклінгу асфальтобетонного покриття методом «in place» та в дослідженнях, пов'язаних з її удосконалюванням

Ключові слова: гарячий ресайклінг, асфальтобетон, експериментально-статистичне моделювання, температура перемішування, регенеруюча добавка

### 1. Вступ

Зростання вантажопідйомності автомобілів та інтенсивності руху вимагає безперервного розвитку дорожньої мережі, вдосконалення конструкцій дорожніх одягів. Поряд з тим, необхідно приділяти особливу увагу поточному ремонту автомобільних доріг, тобто систематичному та своєчасному відновленню експлуатаційного стану, виправленню незначних пошкоджень дорожнього одягу. Це дасть змогу в перспективі мінімізувати вартість робіт з капітального ре-

монтажу та зменшити витрати на експлуатаційне утримання протягом всього життєвого циклу дорожнього одягу.

На теперішній час існує ряд традиційних технологічних рішень щодо виконання робіт з поточного ремонту нежорсткого дорожнього одягу. До традиційних можна віднести наступні варіанти поточних ремонтів:

- ліквідація дрібних пошкоджень існуючого дорожнього покриття (вибоїни, тріщини, колійність тощо) з наступним влаштуванням асфальтобетонного чи щебенево-мастикового шару;
- суцільне фрезерування верхнього шару існуючого дорожнього покриття з наступною його заміною;
- влаштування шарів зносу з литих емульсійно-мінеральних сумішей та поверхневих обробок.

Всі вони передбачають заміну верхнього шару дорожнього покриття або нарощування нових шарів зносу. Це спричиняє ряд суттєвих недоліків [1]:

- значні фінансові витрати на влаштування нових шарів покриття;
- необхідність утилізації матеріалів старого покриття;
- підняття висотних відміток покриття (особливо вулиці і проїзди міст та інших населених пунктів, мостові переходи);
- наявна ймовірність утворення з часом відображених руйнувань;
- збільшення навантаження від власної маси на мостові конструкції при нарощуванні шарів покриття.

В таких умовах пріоритетним напрямком досліджень є ресурсозберігаючі технології, використання яких дозволяє досягнути значної фінансової економії шляхом оптимізації будівельних процесів, використання сучасної будівельної техніки та повторного використання будівельних матеріалів [1–3]. До таких технологій відноситься гарячий ресайклінг асфальтобетону методом «in place».

Суттєвою перевагою технології гарячого ресайклінгу асфальтобетону методом «in place» є виконання повного циклу робіт спеціалізованою технікою за один робочий прохід.

До переваг цієї технології відноситься також стовідсоткове використання матеріалу існуючого асфальтобетонного покриття, стислі строки виконання робіт, можливість виконання робіт з перекриттям руху транспорту лише по одній смузі руху [2].

Основною умовою ефективного застосування технології є структурна цілісність розташованих нижче шарів дорожнього одягу у випадку, коли верхній шар покриття має багато дефектів у вигляді тріщин або сітки тріщин, колій, вибоїв, а також зсувів, пов'язаних з недостатньою зсувостійкістю асфальтобетонів. При такому виді ремонту старий матеріал використовуються повністю [2].

В той же час ефективність даної технології суттєво залежить від якості отриманої регенерованої суміші. На даний час потребують дослідження залежності фізико-механічних показників регенерованої гарячої асфальтобетонної суміші від одночасного впливу декількох вагомих факторів в процесі її приготування. Тому проведення таких робіт є актуальними. Встановлення залежності впливу факторів на процес гарячого ресайклінгу асфальтобетону дасть змогу оптимізувати технологію та зменшити собівартість виконання робіт.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [4] встановлено, що гаряча регенерація дорожніх одягів є максимально ефективною, коли строк експлуатації не перевищує (8–10) років при міжремонтних строках (12–14) років. За цей період дорожній одяг втрачає лише близько 40 % якості, в той же час в наступні (2–4) роки залишковий ресурс зменшується до 20 %. Вчасно виконані ремонтні роботи дозволять попередити стрімкий розвиток руйнувань на дорожньому покритті та продовжити його строк служби. В роботі досліджено вплив вмісту старого бітуму на якісні характеристики регенерованого асфальтобетону. В той же час ці дані є узагальнюючими і не відображають залежності довговічності відремонтованого покриття від комплексного впливу внутрішніх структурних та зовнішніх погоднокліматичних факторів.

Дослідження авторів роботи [5] показали, що при гарячій регенерації асфальтобетону дуже важливо враховувати зміну властивостей бітуму, який є основною складовою, що характеризує поведінку регенерованого асфальтобетону. Причиною зміни властивостей бітуму є його експлуатаційне старіння, яке відбувається під дією різних погоднокліматичних факторів (температура, кисень та ультрафіолетове випромінювання).

Крім того, результати досліджень, наведених в роботах [2, 6], свідчать про те, що у процесі гарячого ресайклінгу асфальтобетону методом «in place» внаслідок жорстких умов розігрівання покриття асфальторозігрівачем додатково відбувається інтенсивне старіння бітуму. Це проявляється у значному зниженні показника penetрації бітуму на (20–25) % і втрати асфальтобетоном комплексу експлуатаційних характеристик. Однак в роботі залишились невирішеними питання, пов'язані зі зміною фізико-механічних властивостей регенерованого асфальтобетону в залежності від температури перемішування. Вплив високих технологічних температур призводить до випаровування низькомолекулярних компонентів органічного в'язучого масел і частково смол. Це робить в'язуче більш твердим, крихким і менш деформативним. Асфальтобетонна суміш з таким в'язучим не буде довговічною, а технологія гарячого ресайклінгу економічно не вигідною. Все це дозволяє стверджувати про необхідність встановлення оптимальних технологічних температур, а також пошуку шляхів зниження технологічного старіння бітуму.

Варіантом вирішення проблеми старіння бітуму може бути використання регенеруючих добавок – продуктів на основі важких нафтових олив, або іншого складу. Введення таких добавок забезпечує пластифікацію залишкового бітуму і часткове відновлення його експлуатаційних властивостей [7, 8]. З метою усунення проблеми старіння бітуму при проектуванні складів регенерованого асфальтобетону в роботі [4] зазначено про важливість додавання нового бітуму.

На практиці встановлено, що вміст залишкового бітуму в фрезерованому асфальтобетоні може змінюватися від 4 до 8 %. Але на сьогоднішній день при наявності на ринку великої кількості різних видів регенеруючих добавок відсутні дані щодо точної кількості їх дозування залежно від вмісту залишкового бітуму для різних типів асфальтобетонних сумішей.

Враховуючи високу ринкову вартість регенеруючих добавок, доцільним є визначення її оптимальної кількості залежно від вмісту залишкового бітуму при якій комплекс експлуатаційних властивостей регенованого асфальтобетону буде найкращим.

Важливою складовою технологічного процесу гарячого ресайклінгу асфальтобетону методом «in place» є розігрівання асфальтобетонного покриття на певну глибину із застосуванням теплової енергії інфрачервоного опромінювання [9].

Результати випробувань зразків асфальтобетону після багаторазового розігріву, наведені в роботах [9, 10], свідчать, що за температур, не вищих ніж 180 °С, та тривалості розігрівання до 30 хв. асфальтобетон не змінює характеристики. При забезпеченні температури на поверхні асфальтобетонного покриття (160–180) °С глибина прогрівання асфальтобетону до переходу його у пластичний стан сягає (4–6) см при певних габаритах та швидкості переміщення асфальторозігрівача [9]. Орієнтовні значення температури асфальтобетону на різній відстані від поверхні наведено в роботі [9]. Проте в роботі не враховано вплив швидкості руху асфальторозігрівача на глибину прогрівання шару асфальтобетону. В той же час, в роботі [9] встановлена мінімальна температура попереднього нагрівання дорожнього покриття – 120 °С, при якій забезпечуються ефективно перемішування асфальтобетонної суміші та якісні показники регенованого покриття.

Авторами в роботах [8, 10] встановлено вплив температури та тривалості перемішування суміші на її однорідність. Проведені дослідження показали, що підвищення однорідності суміші досягається збільшенням температури нагріву. Способом підвищення однорідності суміші може бути також збільшення тривалості її перемішування.

Проте дослідження граничних значень температури розігрівання дорожнього покриття та приготування регенованих гарячих асфальтобетонних сумішей не дає в повній мірі інформації щодо оптимальних температурних режимів, оскільки діапазон розігріву досить широкий – (120–180) °С.

В дослідженні [11] показано, що недостатня температура розігрівання покриття є однією з головних причин неякісного виконання робіт з гарячого ресайклінгу асфальтобетону методом «in place». З іншого боку надмірно висока температура розігріву покриття прискорює старіння бітуму та знижує якість регенованої суміші.

Температура розігріву та перемішування регенованої асфальтобетонної суміші є вагомим фактором, що визначають якісь регенованого асфальтобетонного шару покриття. Визначення її раціонального значення є актуальною науковою задачею, яка має як теоретичне так і практичне значення.

Таким чином, за результатами аналізу досвіду застосування технології гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі необхідно відмітити, що цілу низку наукових робіт присвячено дослідженню впливу факторів на кінетику технологічних процесів приготування регенованої суміші. До таких факторів можна віднести температуру розігріву покриття, вміст старого та доданого бітуму, вміст регенеруючої добавки, температуру перемішування суміші при приготуванні, тривалість перемішування та його однорідність. Проте, потребу-

ють вирішення питання обґрунтування вагомості факторів, що суттєво впливають на фізико-механічні характеристики регенерованого асфальтобетону та визначення оптимальних технологічних режимів його приготування. Рішення, що отримані в роботах [3, 7, 8, 10, 12], здебільшого ґрунтуються на встановленні впливу окремих факторів на фізико-механічні властивості регенерованого асфальтобетону. Це дає підстави стверджувати про доцільність проведення досліджень впливу декількох вагомих факторів одночасно, що відповідає реальній ситуації під час застосування гарячого ресайклінгу.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою роботи є оптимізація температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки при гарячому ресайклінгу асфальтобетонного покриття методом «in place». При цьому, регенерована суміш за показниками фізико-механічних властивостей повинна задовольняти вимоги ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови» до гарячих дрібнозернистих асфальтобетонних сумішей. Це дасть можливість забезпечити міцність та довговічність дорожнього покриття.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- встановити найбільш вагомі фактори, що суттєво впливають на фізико-механічні показники регенерованого асфальтобетону;
- провести експериментальні дослідження впливу обґрунтованих вагомих факторів на фізико-механічні показники регенерованого асфальтобетону;
- встановити області раціональних значень обґрунтованих факторів.

### **4. Матеріали і методи досліджень процесу приготування регенерованої гарячої асфальтобетонної суміші**

В якості матеріалів для дослідження було обрано регенеровану гарячу асфальтобетонну суміш, яка за зерновим складом та вмістом бітуму відповідала суміші гарячій, дрібнозернистій, асфальтобетон щільний, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки П відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Вміст залишкового бітуму розпушеної асфальтобетонної крихти становив 6,0 %.

В якості регенеруючої добавки використовували «омолоджуючу» добавку, виготовлену на основі силану, в поєднанні з рослинними та парафіновими маслами, застосування якої дозволяє забезпечити пластифікацію старого бітумі.

Дослідження проводилися в лабораторії Державного підприємства «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНД») на обладнанні: шафа температурна типу «MATEST»; прес гідравлічний «MATEST»; установка вакуумна «УВ-12»; ваги лабораторні 4-го класу точності згідно з ДСТУ EN 45501.

Методи дослідження були визначені згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань».

Для проведення випробування були виготовлені зразки з регенерованої асфальтобетонної суміші при різних температурах приготування та з різною кіль-

кістю добавки. Температура приготування визначалася та підтримувалася температурною шафою типу «MATEST».

Випробування проведені за показниками водонасичення та границя міцності на стиск за температури 0 °C та 50 °C.

Визначення водонасичення полягає у вимірюванні кількості води, яку поглинає зразок при заданому режимі насичення. Водонасичення визначають на зразках, виготовлених у лабораторії з суміші. За результат визначення водонасичення приймають округлене до першого десяткового знака середньоарифметичне значення трьох визначень.

Міцність на стиск визначають шляхом встановлення граничного напруження, що призводить до руйнування зразка при заданих умовах випробування. Визначення границі міцності при стиску виконують на зразках, виготовлених у відповідності з вимогами нормативних документів. При кожній заданій температурі випробовують по три зразка. Зразки для випробувань застосовують одного віку.

З метою встановлення найбільш вагомих факторів, що впливають на фізико-механічні показники регенованого асфальтобетону, використаний метод експертних оцінок [13–15].

Загальна схема експертних опитувань включала наступні етапи:

- підбір експертів;
- формування питань і складання анкет; робота з експертами;
- формування правил визначення сумарних оцінок на основі оцінок окремих експертів;
- аналіз і обробка експертних оцінок.

Для оптимізації параметрів технології гарячого ресайклінгу застосовано метод експериментально-статистичного моделювання.

Для побудови математичної моделі та оцінки значень функцій параметрів оптимізації було проведено багатофакторний експеримент. За остаточний результат кожної серії дослідів приймали середнє арифметичне значення результатів трьох випробувань для кожного значення функції відгуку.

Під час проведення досліджень було визначено довірчий інтервал для кожного експерименту і проведено його порівняння із загальним розкидом значень.

В результаті отримані коефіцієнти рівняння регресії, на основі яких встановлені математичні моделі, що характеризують функції відгуку. Встановлені залежності були змодельовані в середовищі STATISTICA.

## **5 Результати досліджень оптимізації параметрів технології гарячого ресайклінгу асфальтобетонного покриття**

### **5.1. Встановлення вагомості факторів**

В якості факторів, що включені в опитування, були прийняті основні технологічні та технічні показники (табл. 1). Вибір факторів обґрунтовано експертною оцінкою фахівців та вимогами ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови».

В опитуванні прийняли участь 10 експертів. З метою отримання найбільш об'єктивних результатів в якості експертів були вибрані кваліфіковані фахівці з представників:

- підрядних організацій – ТОВ «СТІ» (Україна), ТОВ «АБЗ-1» (Україна);
- замовників – Служби автомобільних доріг у Чернігівській та Чернівецькій областях (Україна);
- науково-дослідних установ – Національний транспортний університет (Україна), Одеська національна академія будівництва та архітектури (Україна), ДП «ДерждорНДІ» (Україна).

Таблиця 1

Фактори та їх кодовані позначення

Досліджувана змінна (фактор)	Позначення фактору
Вміст старого бітуму	$X_1$
Вміст доданого бітуму	$X_2$
Температура перемішування суміші при приготуванні	$X_3$
Вміст регенеруючої добавки	$X_4$
Тривалість перемішування суміші при приготуванні	$X_5$
Температура розігріву покриття	$X_6$
Зерновий склад	$X_7$
Температура ущільнення суміші	$X_8$
Однорідність перемішування	$X_9$

Основним критерієм відбору експертів була наявність досвіду роботи з технологіями гарячого ресайклінгу асфальтобетону. На основі даних анкетного опитування складена зведена матриця рангів (табл. 2).

Таблиця 2

Зведена матриця рангів

Фахівець, який бере участь в опитуванні	Ранги факторів, що включені в опитування								
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
1	4	3	2	1	5	6	8	7	9
2	2	3	1	4	7	4	7	6	5
3	4	6	2	3	1	5	7	8	9
4	1	4	3	2	7	4	6	5	7
5	5	1	2	3	6	4	6	7	5
6	3	2	4	5	4	1	3	5	6
7	4	2	3	1	5	6	6	7	7
8	5	6	3	2	1	5	4	7	5
9	1	4	2	4	3	5	6	5	7
10	2	5	3	1	4	7	6	7	5
Сума рангів по факторах $\sum_{j=1}^n a_{ji}$	31	36	25	26	43	47	59	64	65
Умовний ранг факторів по	3	4	1	2	5	6	7	8	9

сумі рангів $a_i$									
-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$a_i$  – ранг  $i$ -го фактора у  $j$ -го опитуваного фахівця,  $n$  – кількість опитуваних фахівців.

Враховуючи, що деякі експерти не змогли розділити ступінь впливу певних факторів і поставили однакові ранги, виконується перетворення рангів. З цією метою кожен однаковий ранг  $j$ -го фахівця замінюється перетвореним, що обчислюється за співвідношенням [15]:

$$b = \frac{\sum_{i_1}^{k_1} (k_2 + i)}{k_1}, \quad (1)$$

де  $k_1$  – число однакових рангів у відповідній групі рангів для визначеного опитуваного фахівця;  $k_2$  – кількість факторів, які розташовані попереду групи факторів з однаковими рангами.

Перетворені ранги наведені в табл. 3.

Перевірка правильності складання матриці на основі обчислення контрольної суми визначається за формулою [15]:

$$\sum_{i=1}^k b_{ji} = \frac{(1+k) * k}{2}, \quad (2)$$

де  $k$  – кількість досліджуваних факторів.

Наступним етапом є аналіз значимості досліджуваних факторів. Табл. 3 показує, що найбільш значимими факторами є  $X_3$  та  $X_4$ , найменш значимим –  $X_8$ .

Для оцінки узагальненої міри узгодженості думок по всім факторам необхідно розрахувати коефіцієнт конкордації [15]:

$$W = \frac{12 * \sum_{j=1}^n \Delta_i^2}{\left( n^2 (k^3 - k) - n * \sum_{j=1}^n T_j \right)}, \quad (3)$$

де

$$T_i = \sum_{\eta_r=1}^{l_j} (\eta_r^3 - \eta_r), \quad (4)$$

де  $\eta_r$  – чисельність груп однакових рангів  $j$ -го фахівця;  $l_j$  – кількість груп однакових рангів  $j$ -го фахівця.



Таблиця 3  
Перетворені ранги

Фахівець, який бере участь в опитуванні	Зв'язані ранги факторів, що включені в опитування									Сума рангів по фахівцях $\sum_{i=1}^k b_{ji}$	Чисельність однакових рангів $\eta_r$	$T_j$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$			
1	4,0	3,0	2,0	1,0	5,0	6,0	8,0	7,0	9,0	45	-	-
2	2,0	3,0	1,0	4,5	8,5	4,5	8,5	7,0	6,0	45	2; 2	12
3	4,0	6,0	2,0	3,0	1,0	5,0	7,0	8,0	9,0	45	-	-
4	1,0	4,5	3,0	2,0	8,5	4,5	7,0	6,0	8,5	45	2; 2	12
5	5,5	1,0	2,0	3,0	7,5	4,0	7,5	9,0	5,5	45	2; 2	12
6	3,5	2,0	5,5	7,5	5,5	1,0	3,5	7,5	9,0	45	2; 2; 2	18
7	4,0	2,0	3,0	1,0	5,0	6,5	6,5	8,5	8,5	45	2; 2	12
8	6,0	8,0	3,0	2,0	1,0	6,0	4,0	9,0	6,0	45	3	24
9	1,0	4,5	2,0	4,5	3,0	6,5	8,0	6,5	9,0	45	2; 2	12
10	2,0	5,5	3,0	1,0	4,0	8,5	7,0	8,5	5,5	45	2; 2	12
Сума рангів по факторах $\sum_{i=1}^n b_{ji}$	33,0	39,5	26,5	29,5	49,0	52,5	67,0	77,0	76,0	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n b_{ij} = 450$	-	$\sum_{j=1}^n T_j = 114$
Умовний ранг по сумі рангів $\beta_i$	3	4	1	2	5	6	7	9	8	-	-	-
Відхилення суми рангів від середнього $\Delta_i$	-17,0	-10,5	-23,5	-20,5	-1,0	2,5	17,0	27,0	26,0	$\sum_{j=1}^n \Delta_i = 0$	-	-
Квадрати відхилень $\Delta_i^2$	289,0	110,3	552,3	420,3	1,0	6,3	289,0	729,0	676,0	$\sum_{j=1}^n \Delta_i^2 = 3073$	-	-

Коефіцієнт конкордації для даної матриці значень становить 0,52. При повній погодженості фахівців в оцінці поставленої задачі  $W=1$ , а при повній відсутності погодженості  $W=0$ .  $W=0,52$  вказує на наявність середнього ступеня узгодженості думок експертів.

З метою оцінки вагомості коефіцієнта конкордації розраховується критерій узгодження Пірсона [15]:

$$X^2 = n * (k - 1) * W. \quad (5)$$

Критерій узгодження Пірсона, розрахований для даної матриці, становить 41,63 та є більшим за табличне значення (15,51) для числа ступенів свободи  $k-1=9-1=8$  при заданому рівні вагомості  $\alpha=0.05$ . Враховуючи зазначене, можна зробити висновок, що  $W=0,52$  – величина не випадкова, а тому отримані результати мають сенс і можуть використовуватися в подальших дослідженнях.

Для розрахунку показників вагомості кожного фактору необхідно матрицю, отриману за результатами опитування (табл. 2), відобразити через матрицю перетворених рангів (табл. 4), використовуючи формулу:

$$S_{ij} = X_{\max} - X_j, \quad (6)$$

де  $X_{\max} = 9$ .

Таблиця 4  
Матриця перетворених рангів

Фахівець, який бере участь в опитуванні	Ранги факторів, що включені в опитування								
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
1	5	6	7	8	4	3	1	2	0
2	7	6	8	5	2	5	2	3	4
3	5	3	7	6	8	4	2	1	0
4	8	5	6	7	2	5	3	4	2
5	4	8	7	6	3	5	3	2	4
6	6	7	5	4	5	8	6	4	3
7	5	7	6	8	4	3	3	2	2
8	4	3	6	7	8	4	5	2	4
9	8	5	7	5	6	4	3	4	2
10	7	4	6	8	5	2	3	2	4
Сума рангів	59	54	65	64	47	43	31	26	25
Сума рангів всього	$\Sigma=414$								
Вага фактору	0,143	0,130	0,157	0,155	0,114	0,104	0,075	0,063	0,060

Отже, найбільш значимими є фактори  $X_3$  та  $X_4$ , тобто температура перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки.

## 5. 2. Проведення експериментальних досліджень та побудова математичних моделей

Для проведення дослідження було прийнято рішення досліджувати два найбільш вагомні фактори на трьох рівнях. З урахуванням вагомості впливу для визначення оптимальних складів регенерованої гарячої асфальтобетонної суміші були прийняті температура перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки.

Кількість експериментів, які повинні проводитись, можливо розрахувати за формулою [15]:

$$N_e = 3^n, \quad (7)$$

де 3 – кількість рівнів,  $n$  – кількість факторів. За формулою (7) визначено кількість експериментів, що потрібні для вирішення завдань оптимізації – 9. На основі апріорної інформації були вибрані інтервали варіювання факторів та проведено їх кодування (табл. 5).

Таблиця 5  
Значення факторів варіювання

Ч.ч.	Код фактору	Фізичний зміст фактору	Одиниця виміру	Інтервал варіювання	Значення фактору		
					Рівні		
					-1	0	+1
1	$X_1$	Температура приготування, Т	°С	20	100	120	140
2	$X_2$	Вміст регенеруючої добавки, $C_d$	%	0,05	0,2	0,25	0,3

В якості параметрів оптимізації (функції відгуку) прийняті міцнісні показники асфальтобетону, які характеризують поведінку його роботи в найбільш критичних умовах – міцність на стиск при 0 °С та при 50 °С, а також фізичний показник – водонасичення. Граничні значення функції відгуку прийняті для дрібнозернистого щільного асфальтобетону, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки ІІ відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 (табл. 6).

Таблиця 6  
Значення параметрів оптимізації (функції відгуку)

Ч.ч.	Код фактору	Фізичний зміст фактору	Одиниця виміру	Граничні значення функції відгуку
1	$Y_1$	Водонасичення, W, не більше	%	3,5
2	$Y_2$	Границя міцності на стиск при 0 °С, $R_{ст}^0$ , не більше	МПа	13,0
3	$Y_3$	Границя міцності на стиск при 50 °С, $R_{ст}^{50}$ , не менше	МПа	1,1

За основу математичної моделі прийнято рівняння регресії що представлене у вигляді [15]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2, \quad (8)$$

де  $b_0$  – вільний член рівняння;  $b_1$  – коефіцієнти лінійних членів рівняння;  $b_{ij}$  – коефіцієнти членів парних взаємодій рівняння;  $x_i$ ,  $x_j$  – кодований вид входних факторів.

Для визначення коефіцієнтів  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_{ij}$  необхідно скласти і вирішити 3 рівняння, невідомими в яких є параметри даної функції, тому необхідно провести як мінімум 9 експериментів за планом повного факторного експерименту

(табл. 7). Експерименти проводили з урахуванням вимог ДСТУ Б В.2.7-319:2016 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань».

Таблиця 7

Матриця планування, результати дослідів

Номер дослідів	Порядок проведення дослідів	Значення факторів варіювання				Значення функції відгуку		
		Кодовані		Натуральні				
		$X_1, \%$	$X_2, \%$	$X_1, \%$	$X_2, \%$	$Y_1, \%$	$Y_2, \text{МПа}$	$Y_3, \text{МПа}$
1	8	−1	−1	100	0,2	5,34	11,72	1,65
2	9	−1	0	100	0,25	4,82	11,26	1,49
3	7	−1	1	100	0,3	4,45	10,50	1,22
4	5	0	−1	120	0,2	4,17	10,99	1,56
5	3	0	0	120	0,25	3,86	10,54	1,28
6	2	0	1	120	0,3	3,36	9,31	1,17
7	1	1	−1	140	0,2	3,25	11,96	1,47
8	4	1	0	140	0,25	2,69	11,66	1,29
9	6	1	1	140	0,3	2,68	11,17	1,18

Коефіцієнти рівняння регресії та математичні моделі наступні:

– для параметра оптимізації  $Y_1$

$$b_0 = 18,8467; \quad b_1 = -0,1149; \quad b_2 = -34,1667;$$

$$b_{11} = 0,0002; \quad b_{12} = 0,08; \quad b_{22} = 34;$$

$$Y_1 = 18,8467 - 0,1149x_1 - 34,1667x_2 + 0,0002x_1^2 + 0,08x_1x_2 + 34x_2^2;$$

– для параметра оптимізації  $Y_2$

$$b_0 = 49,6594; \quad b_1 = -0,675; \quad b_2 = 17,1333;$$

$$b_{11} = 0,0027; \quad b_{12} = 0,1075; \quad b_{22} = 84,6667;$$

$$Y_2 = 49,6594 - 0,675x_1 + 17,1333x_2 + 0,0027x_1^2 + 0,1075x_1x_2 + 84,6667x_2^2;$$

– для параметра оптимізації  $Y_3$

$$b_0 = 5,9389; \quad b_1 = -0,0402; \quad b_2 = -12,2333;$$

$$b_{11} = 0,0001; \quad b_{12} = 0,035; \quad b_{22} = 8,6667;$$

$$Y_3 = 5,9389 - 0,0402x_1 - 12,2333x_2 + 0,0001x_1^2 + 0,035x_1x_2 + 8,6667x_2^2.$$

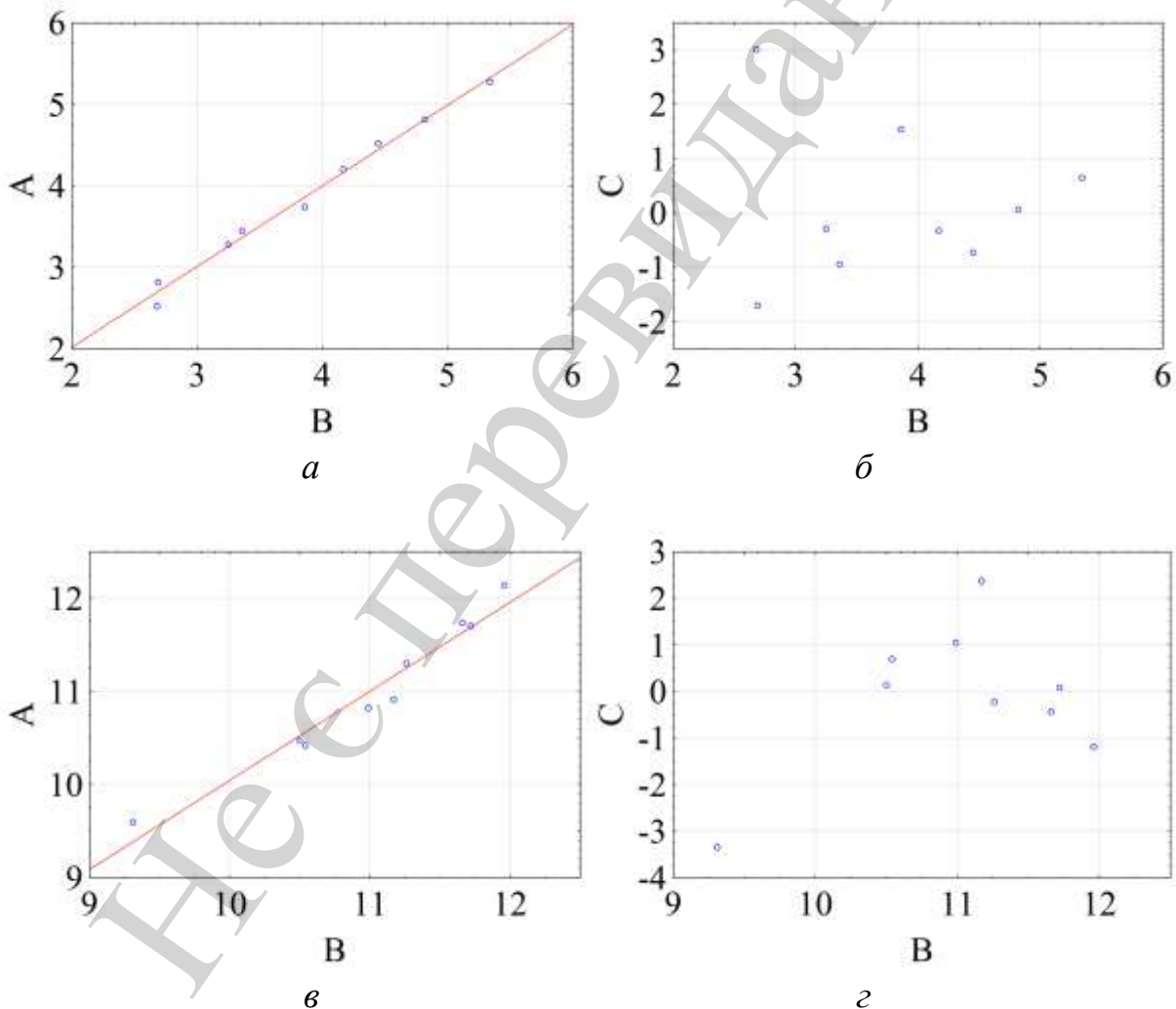
Враховуючи значимість коефіцієнтів рівняння регресії отримуємо наступні математичні моделі параметрів оптимізації:

$$Y_1 = 18,8467 - 0,1149x_1 - 34,1667x_2 + 0,08x_1x_2 + 34x_2^2;$$

$$Y_2 = 49,6594 - 0,675x_1 + 17,1333x_2 + 0,1075x_1x_2 + 84,6667x_2^2;$$

$$Y_3 = 5,9389 - 0,0402x_1 - 12,2333x_2 + 0,035x_1x_2 + 8,6667x_2^2.$$

З метою оцінки придатності отриманих моделей визначали показники відносної похибки між розрахованими та експериментальними значеннями. Для кожної з моделей зазначений показник не перевищує 5 %, тому моделі є адекватними. Результати відносних похибок відповідних моделей представлено на рис. 1.



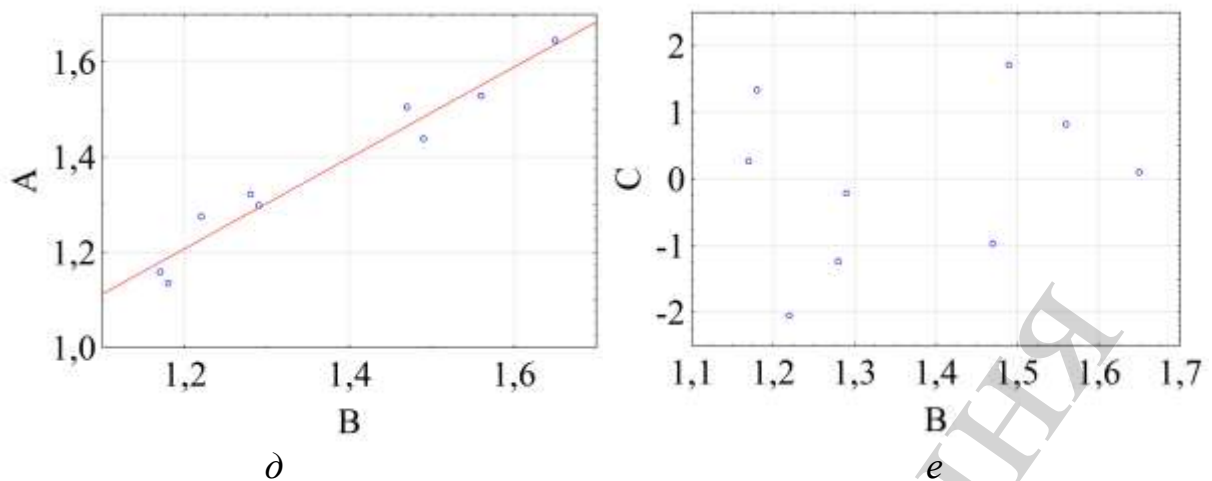
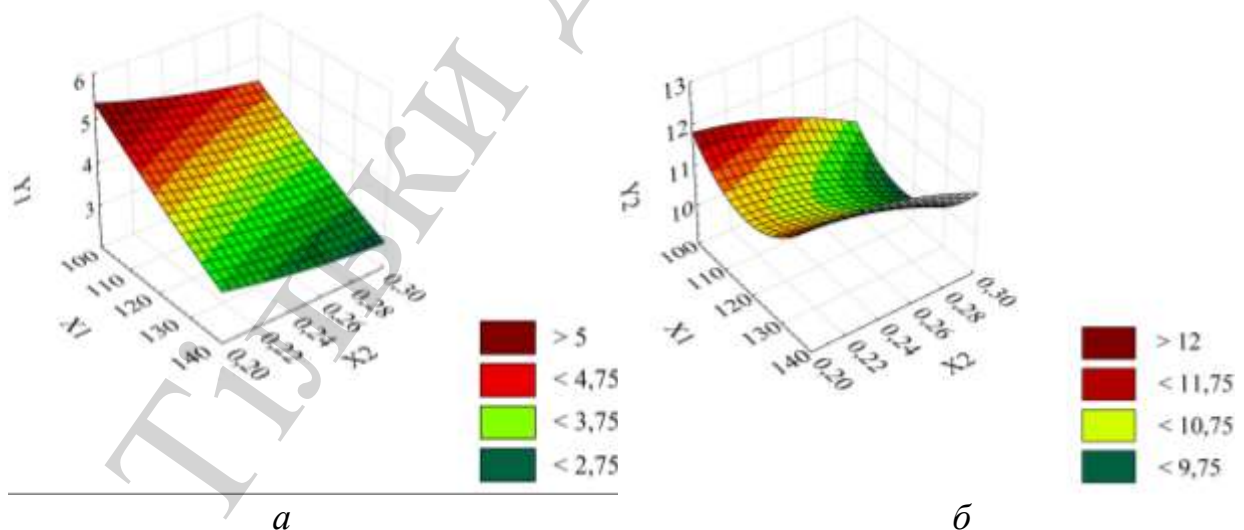


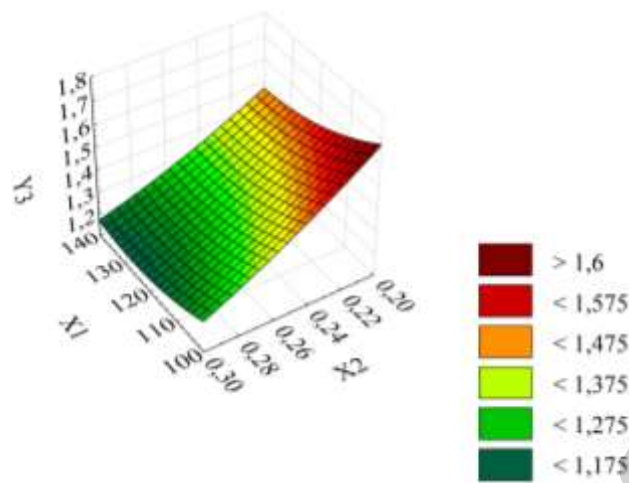
Рис. 1. Графік розрахованих та експериментальних значень функції відгуку, а також оцінка відносної похибки: А – Розрахункові значення; В – Експериментальні значення; С – Відносна похибка; а, б – для Y1; в, г – для Y2; д, е – для Y3

### 5. 3. Визначення області раціональних технологічних параметрів

На основі експериментальних досліджень побудовані тривимірні графіки (рис. 2) зміни вихідних параметрів, які необхідно оптимізувати. На кожному з графіків чітко виділяються області, що обмежені граничними значеннями і на відповідних графіках достатньо легко можна встановити межі цих областей.

На рис. 2 представлені граничні значення для вихідних параметрів: а – Y1 3,5 %; б – Y2 13 МПа; в – Y3 1,1 МПа. У відповідності із граничними значеннями вихідних параметрів можна прийти до висновку, що Y2 та Y3 повністю задовольняють всі досліджувані області, а Y1 тільки в межах 3,5 %.





в

Рис. 2. Тривимірні графічні залежності: а – залежність  $Y_1$  від  $X_1$  та  $X_2$ ; б – залежність  $Y_2$  від  $X_1$  та  $X_2$ ; в – залежність  $Y_3$  від  $X_1$  та  $X_2$

Реалізацію процедури визначення раціонального температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки при гарячому ресайклінгу асфальтобетонного покриття методом «in place» зображено на рис. 3. З цією метою були вибрані значення бажаності для кожної функції відгуку. При виборі враховували їх граничні значення, що наведені в табл. 6.

На рис. 3 представлені графіки зміни водонасичення, міцності на стиск при  $0^\circ\text{C}$  та при  $50^\circ\text{C}$  в залежності від зміни вихідних параметрів. Додавання окремих графіків дають можливість визначити раціональні області вихідних параметрів.

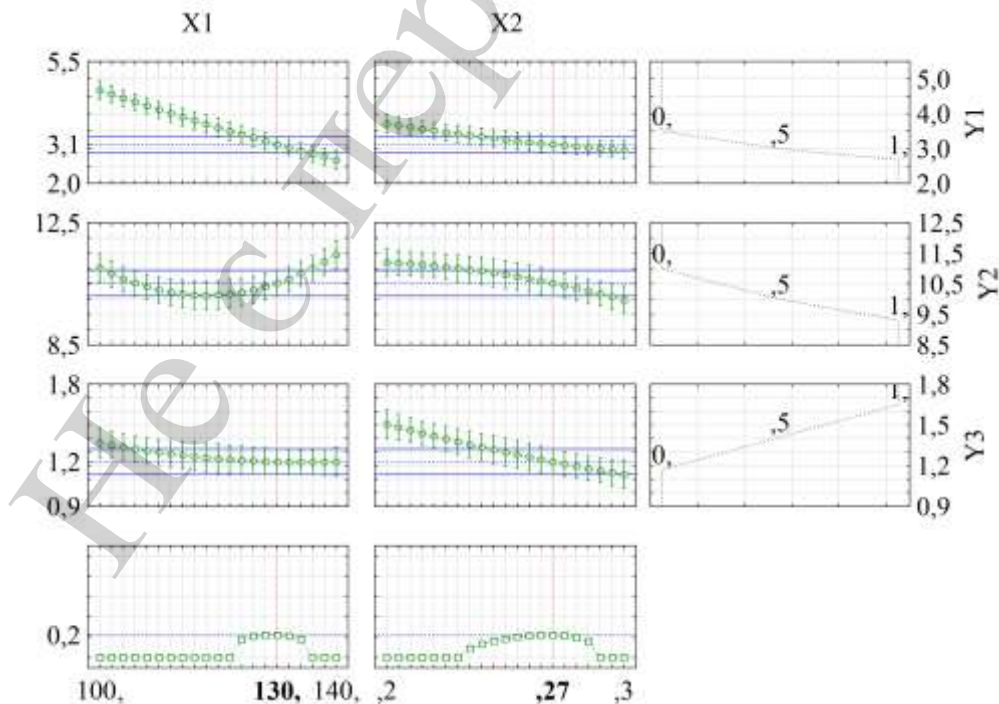


Рис. 3. Графіки знаходження раціонального співвідношення температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки

Враховуючи граничні значення параметрів оптимізації встановлені раціональні області досліджуваних параметрів:

- температура приготування суміші – (125–135) °С;
- вміст регенеруючої добавки – (0,26–0,28) %.

## **6. Обговорення результатів дослідження оптимізації параметрів технології гарячого ресайклінгу асфальтобетонного покриття**

На підставі експертної оцінки визначено найбільші вагомі фактори (температура перемішування та вміст добавки), що впливають на кінетику процесу приготування регенованого асфальтобетону. Цей результат обґрунтовується використанням фундаментальних методів статистики: формули (1)–(4) та табл. 1–6.

На основі експериментальних досліджень регенованої асфальтобетонної суміші встановлені залежності між фізико-механічними показниками регенованого асфальтобетону (водонасичення, міцність на стиск при 0 °С та при 50 °С) та температурою приготування і вмістом регенеруючої добавки. Завдяки врахуванню одночасного впливу двох найбільш вагомих факторів на якість регенованого асфальтобетону вдалося встановити границі областей допустимих значень (рис. 2), а також раціональні співвідношення температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки (рис. 3).

Раціональні співвідношення досліджуваних факторів (температура приготування суміші – (125–135) °С; вміст регенеруючої добавки – (0,26–0,28) %) дозволять максимально ефективно обрати технологічні режими гарячого ресайклінгу на дорозі. Враховуючи, що дослідженнями [9] встановлений діапазон температури розігрівання дорожнього покриття та приготування регенованих гарячих асфальтобетонних сумішей (120–180) °С, зменшення такого діапазону дозволить отримати економічний ефект за рахунок скорочення енерговитрат.

Проте необхідно відмітити, що результати даного дослідження справедливі лише для регенерації дрібнозернистого щільного асфальтобетону, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки ІІ відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 з використанням добавки визначеного виду.

У той же час подальші наукові дослідження необхідно спрямувати на адаптацію отриманих результатів для можливості їх застосування при різних умовах. До таких умов можна віднести різні типи регенованого асфальтобетону, різний вміст залишкового бітуму та регенеруючої добавки, регенерація з можливістю додавання нового кам'яного матеріалу, бітуму чи асфальтобетонної суміші.

Отримані результати дослідження можуть бути використані на практиці при встановленні раціональних технологічних параметрів роботи реміксера.

## **7. Висновки**

1. Встановлено, що основними факторами впливу на фізико-механічні показники регенованого асфальтобетону є технологічна температура перемішування та вміст регенеруючої добавки.

2. Враховуючи граничні значення параметрів оптимізації, встановлено, що міцність на стиск при 0 °С та при 50 °С повністю задовольняють всі досліджувані



області, а водонасичення тільки в області до 3,5 %. Збільшення технологічної температури перемішування призводить до зменшення показника водонасичення.

3. Визначено області раціональних значень прийнятих факторів варіювання що відповідають температурі перемішування (125–135) °C та вмісту добавки (0,26–0,28) % від маси регенованого матеріалу. При таких значеннях факторів показник водонасичення зразків регенованого асфальтобетону становить біля 3,1 %; міцність на стиск при 0 °C – близько 10,5 МПа; міцність на стиск при 50 °C – близько 1,2 МПа.

## Література

1. Bruns, T. (2020). High-elevation Colorado road gets the hot in-place treatment. Roads & Bridges. URL: <https://www.roadsbridges.com/high-elevation-colorado-road-gets-hot-place-treatment?fbclid=IwAR2Erflwtxx4WEUAkv2dqpmmumRS4l76vmMUy-yFEuC6PmsTwHQbtIfwDG3Q>
2. Basic asphalt Recycling Manual (2001). US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 277. URL: <https://cdrecycling.org/site/assets/files/1081/1-124-barm1.pdf>
3. Dude, A. (2014). Manual series No 2. Asphalt Mix Design Methods. Asphalt Institute. URL: [https://www.academia.edu/39782610/Design\\_Methods\\_Aspphalt\\_Mix\\_7th\\_Edition\\_MS-2\\_Aspphalt\\_Mix\\_Design\\_Methods\\_7th\\_Edition](https://www.academia.edu/39782610/Design_Methods_Aspphalt_Mix_7th_Edition_MS-2_Aspphalt_Mix_Design_Methods_7th_Edition)
4. Kandhal, P., Mallick, R. (1997). Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Publ. No. FHWA-SA-98-042. US Department of Transportation, Federal Highway Administration; Research, Development, and Technology. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/>
5. Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Navaro, J. (2013). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. Construction and Building Materials, 41, 175–181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.031>
6. Терещенко, Т. А. (2014). Шляхи розвитку технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону. Автошляховик України, 2, 42–48. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/au\\_2014\\_2\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_13)
7. Cox, B. C., Howard, I. L., Middleton, A. (2016). Case Study of High-Traffic In-Place Recycling on U.S. Highway 49: Multiyear Performance Assessment. Journal of Transportation Engineering, 142 (12), 05016008. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000900](https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000900)
8. Navaro, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Colin, J., Dony, A., Cournet, J. (2012). Observation and evaluation of the degree of blending of reclaimed asphalt concretes using microscopy image analysis. Construction and Building Materials, 37, 135–143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.048>
9. Сюньи, Г. К., Усманов, К. Х., Файнберг, Э. С. (1984). Регенерированный дорожный асфальтобетон. М.: Транспорт, 118.
10. Li, X., Lv, X., Zhou, Y., You, Z., Chen, Y., Cui, Z., Diab, A. (2020). Homogeneity evaluation of hot in-place recycling asphalt mixture using digital image

processing technique. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120524. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120524>

11. Anderson, K. V., Russell, M., Uhlmeyer, J. S. et. al. (2016). Long-Term Performance of a Hot In-Place Recycling Project – Final Report. Washington State Department of Transportation, 99. URL: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/738.2.pdf>

12. Liu, Y., Wang, H., Tighe, S. L., Zhao, G., You, Z. (2019). Effects of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 226, 288–298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.277>

13. Slavinska, O., Stozhka, V., Kharchenko, A., Bubela, A., Kvatadze, A. (2019). Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (97)), 46–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>

14. Slavinska, O., Savenko, V., Kharchenko, A., Bubela, A. (2017). Development of a mathematical model of evaluation of road-and-transport assets as a component of information-and-management system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (90)), 45–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798>

15. Нечаєв, В. П., Берідзе, Т. М., Кононенко, В. В., Рябушенко, Н. В., Брадул, О. М. (2005). *Теорія планування експерименту*. Київ: Кондор, 232.

16.